

Кластеры в направлениях прихода космических лучей с $E_0 \approx 2 \cdot 10^{17}$ эВ по данным якутской установки ШАЛ

А. В. Глушков¹⁾

Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра Сибирского отделения РАН
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 26 ноября 2001 г.

Приведены результаты анализа направлений прихода космических лучей с энергиями $E_0 \approx (1.3-4) \cdot 10^{17}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 53^\circ$, зарегистрированных на Якутской установке за период 1974–2001 гг. Показано, что они имеют большое количество кластеров, коррелирующих с плоскостью Сверхгалактики.

PACS: 96.40.–z, 98.70.–f

1. Существует мнение, что первичное космическое излучение (ПКИ) сверхвысоких энергий ($E_0 > 10^{17}$ эВ) состоит в основном из заряженных частиц: протонов и ядер различных химических элементов. Они сильно перемешиваются магнитным полем Галактики и имеют почти изотропное распределение на небесной сфере. В этих условиях трудно обнаружить локальные источники ПКИ. Такое представление не является бесспорным, поскольку прямые измерения состава ПКИ сверхвысоких энергий пока отсутствуют, а выводы из данных по широким атмосферным ливням (ШАЛ) неоднозначны и противоречивы.

В [1, 2] сообщалось, что в направлениях прихода ПКИ с $E_0 > 4 \cdot 10^{17}$ эВ наблюдается значительное количество групп ливней в узких телесных углах. Их распределение на небесной сфере имеет мелкомасштабную упорядоченную структуру, которую нельзя объяснить случайными статистическими процессами. По мнению автора, это может быть связано с распределением внегалактических точечных источников ПКИ, генерирующих нейтральные частицы. Ниже приведены некоторые новые факты в пользу такой точки зрения.

2. Исследуемые характеристики и обсуждения. Здесь рассмотрены ШАЛ с энергиями $E_0 \approx (1.3-4) \cdot 10^{17}$ эВ и зенитными углами $\cos \theta \geq 0.6$, зарегистрированные на Якутской установке за период 1974–2001 гг. Исследована мелкомасштабная анизотропия, то есть локальные неоднородности ПКИ $\sim 5-10^\circ$. В анализ вошли ШАЛ, направления прихода которых находились по ≥ 4 станциям, а оси попали в центральный круг установки с радиусом ≤ 1000 м. Эти события дают небольшие ошибки при нахождении основных параметров ШАЛ (направле-

ние и координаты оси, E_0 и др.). Энергия первичных частиц E_0 находилась из соотношений

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.0 \pm 0.02} [\text{эВ}], \quad (1)$$

$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \cdot \exp((\sec \theta - 1) \cdot 1020/\lambda_\rho) [\text{м}^{-2}], \quad (2)$$

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \cdot \lg(\rho_{s,600}(0^\circ)) [\text{г/см}^2], \quad (3)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ – плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня.

Были рассмотрены 36825 ливней в 5 интервалах по энергии с шагом $\Delta \log E_0 = 0.1$. В этих интервалах были взяты по 7 независимых выборок с примерно одинаковым числом событий ≈ 1000 , которые отличались между собой лишь тем, что оси у них попали в разные кольцевые площадки внутри центрального круга установки. Каждая из $35 = 5 \times 7$ выборок была исследована отдельно на наличие у нее локальных групп ливней на небесной сфере. Делалось это следующим образом. Вокруг направления прихода любого ливня находились все “соседи” на угловом расстоянии $d \leq 3^\circ$. Если в круге оказывалось $n \geq 3$ ливней, тогда их координаты усреднялись между собой и использовались в дальнейшем как новые точки (назовем их узлами).

Далее узлы в каждом из 5 интервалов по энергии анализировались отдельно на предмет пересечения между собой $m \geq 2$ раз в любых из 7 выборок при условии, что их центры окажутся на расстоянии $d \leq 3^\circ$. Если такие узлы находились, тогда направления прихода всех входящих в них ливней вновь усреднялись между собой, а этот более крупный узел (назовем его кластером) использовался для дальнейшего анализа.

На рис.1 показана карта расположения кластеров

¹⁾e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

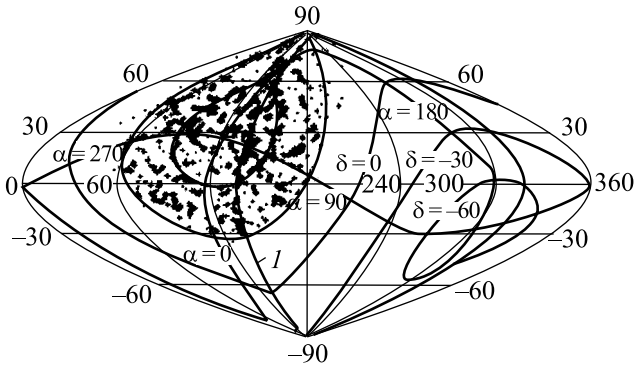


Рис.1. Карта расположения узлов и кластеров из 1882 ливней с $E_0 = 10^{17.2-17.3}$ эВ и $\theta \leq 53^\circ$ в галактических координатах по данным Якутской установки ШАЛ: \bullet – узлы с $m = 1$; $+$ – кластеры с $m \geq 2$ узлов в кругах с радиусом $d = 3^\circ$; кривая 1 – диск Сверхгалактики

на развернутой небесной сфере для ливней с энергиями $E_0 = 10^{17.2-17.3}$ эВ в галактических координатах. Она построена таким образом, что равные площади на рисунке соответствуют равным по площади участкам неба. Сплошной линией проведена плоскость Местного сверхскопления галактик (Сверхгалактики) с координатами северного полюса $\alpha = 286.2^\circ$ и $\delta = 14.1^\circ$. Для удобства восприятия данных на этой карте показаны также экваториальные координаты. Узлы с $m = 1$ и кластеры с $m \geq 2$ изображены соответственно точками и крестиками.

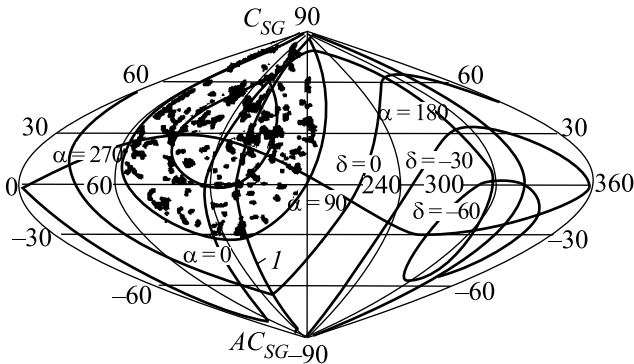


Рис.2. Карта расположения кластеров из 2969 ливней, общих для пяти групп с $E_0 = 10^{17.1-17.2}$, $10^{17.2-17.3}$, $10^{17.3-17.4}$, $10^{17.4-17.5}$ и $10^{17.5-17.6}$ эВ в галактических координатах: кривая 1 – диск Сверхгалактики; C_{SG} и $A_{C_{SG}}$ – центр и антицентр Сверхгалактики

Обращает на себя внимание тот факт, что большинство кластеров собирается в локальные образования. Схожая картина наблюдается и при других энергиях ПКИ. Местоположения кластеров с разными

энергиями часто совпадают между собой. На рис.2 изображена карта кластеров, общих для всех пяти упомянутых выше групп с $E_0 = 10^{17.1-17.2}$, $10^{17.2-17.3}$, $10^{17.3-17.4}$, $10^{17.4-17.5}$ и $10^{17.5-17.6}$ эВ. Они найдены при совпадении угловых координат от 10 до 18 узлов из 35 независимых выборок по ≈ 1000 ливней в каждой. Плотность кластеров вблизи диска Галактики оказалась меньше, чем на больших широтах. Можно также заметить, что событий в полосе $|b_G| \leq 10^\circ$ гораздо меньше, чем вблизи такой же области диска Сверхгалактики.

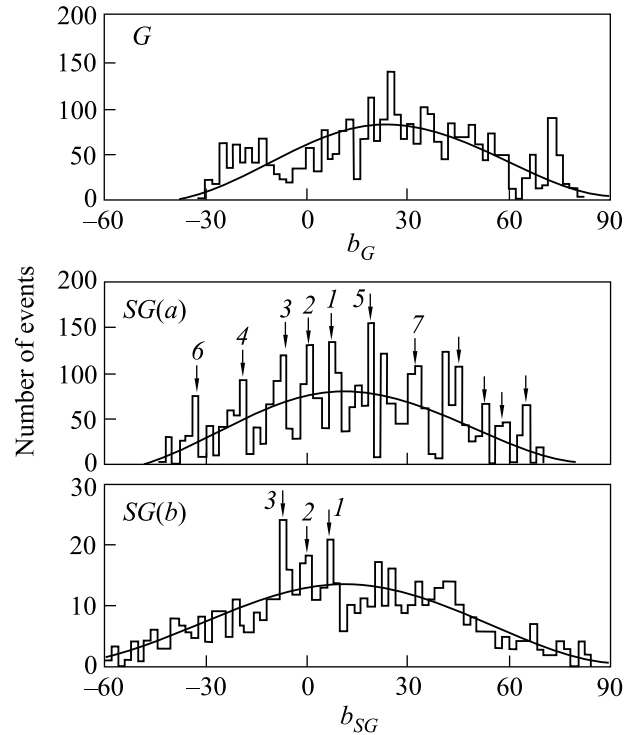


Рис.3. Распределения по направлениям 2969 ливней в кластерах на рис.2 в зависимости от широты их прихода в галактических (G) и сверхгалактических (SG) координатах: b – данные [3] для ШАЛ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ. Плавные кривые – ожидаемые распределения для изотропного потока ПКИ

Отрицательная корреляция кластеров с диском Галактики и положительная с диском Сверхгалактики хорошо видна на рис.3, где представлены распределения по направлениям прихода 2969 ливней (кластеры на рис.2) в галактических (G) и сверхгалактических (SG) координатах в зависимости от широты их прихода (с шагом $\Delta b = 2^\circ$). Кривыми показаны ожидаемые распределения для изотропного потока, вычисленные методом Монте-Карло.

На рис.3 G четко виден провал при $|b_G| \leq 10^\circ$. Дефицит событий в этой области составля-

ет $(395-625)/\sqrt{625} = 9.2\sigma$. Зато на рис.3 $SG(a)$ наблюдается серия статистически значимых пиков. Непосредственно в диске Сверхгалактики находится пик 2. Его превышение над ожидаемой кривой составляет $\approx 6.6\sigma$. Но с учетом расположенных по обе стороны провалов он является еще более значимым. Симметрично плоскости Сверхгалактики расположена серия других пиков. Так пики 1 и 3 удалены от нее на $\approx 6.5^\circ$, пики 4 и 5 – на $\approx 20^\circ$, пики 6 и 7 – на $\approx 33^\circ$. В принципе все пики, отмеченные стрелками, не противоречат дискретному делению с шагом $\approx 6.5^\circ$.

Оба распределения на рис.3 имеют вероятности случайных исходов $< 10^{-6}$. Эти результаты можно интерпретировать как указание на внегалактическую природу заключенной в кластерах доли ПКИ. Галактика, по-видимому, лишь поглощает это излучение, причем более интенсивно – в диске. Другие значимые пики и провалы на рис.3 $SG(a)$ свидетельствуют, скорее всего, о сложной и неоднородной структуре внегалактического пространства, где находятся источники ПКИ, образующие кластеры.

Рассмотрим более детально те события, которые дают основной вклад в пики 1–3. На рис.4 показаны распределения ливней, входящих в эти пики, соответственно в полосах $6^\circ < b_{SG} < 10^\circ$ (1), $-2^\circ < b_{SG} < 4^\circ$ (2) и $-12^\circ < b_{SG} < -6^\circ$ (3) в зависимости от долготы Сверхгалактики:

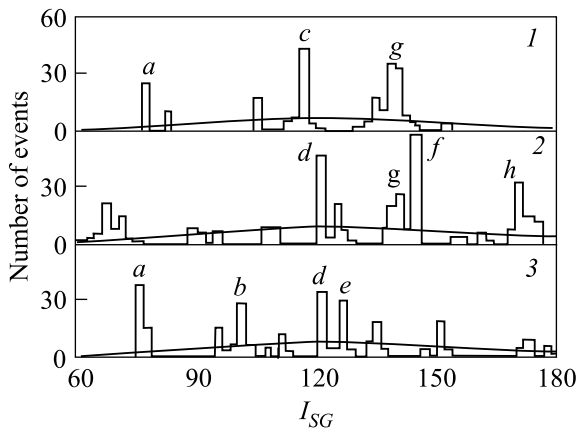


Рис.4. Распределения ливней, входящих в пики 1–3 на рис.3 SG , соответственно в полосах $6^\circ < b_{SG} < 10^\circ$ (1), $-2^\circ < b_{SG} < 4^\circ$ (2) и $-12^\circ < b_{SG} < -6^\circ$ (3) в зависимости от долготы Сверхгалактики: $a - l_{SG} \approx 76^\circ$; $b - l_{SG} \approx 101^\circ$; $c - l_{SG} \approx 117^\circ$; $d - l_{SG} \approx 121^\circ$; $e - l_{SG} \approx 127^\circ$; $g - l_{SG} \approx 140^\circ$; $f - l_{SG} \approx 145^\circ$; $h - l_{SG} \approx 171^\circ$. Плавные кривые – ожидаемые распределения для изотропного потока ПКИ

ты Сверхгалактики (с шагом $\Delta l_{SG} = 2^\circ$), которая отсчитывается от направления на антицентр, против

хода часовой стрелки. Буквами обозначены наиболее мощные пики: $a - l_{SG} \approx 76^\circ$; $b - l_{SG} \approx 101^\circ$; $c - l_{SG} \approx 117^\circ$; $d - l_{SG} \approx 121^\circ$; $e - l_{SG} \approx 127^\circ$; $g - l_{SG} \approx 140^\circ$; $f - l_{SG} \approx 145^\circ$; $h - l_{SG} \approx 171^\circ$. Видно, что местоположения отдельных пиков почти совпадают между собой, а все они (и другие менее значимые) также укладываются в ряд с шагом $\approx 6.5^\circ$.

Отметим одну любопытную деталь. В работе [3] было показано, что пики 1–3 наблюдаются и при $E_0 \geq 10^{19}$ эВ. Мы приводим эти данные на рис.3 $SG(b)$ для сравнения. Видно удивительное сходство распределений с $E_0 \approx (1.3-4) \cdot 10^{17}$ эВ и $E_0 \geq 10^{19}$ эВ в сверхгалактических координатах в области $|b_{SG}| \leq 30^\circ$. Здесь совпадают даже отдельные детали.

В работе [3] было показано также, что в областях расположения пиков 1–3 наблюдаются относительно высокие концентрации скоплений галактик и квазаров, которые имеют определенное отношение к крупномасштабной структуре Вселенной. “Расщепление” направлений прихода ПКИ на пики рис.3 SG и рис.4 можно интерпретировать, как подтверждение адиабатической (“блинной”) теории Зельдовича [4], в которой геометрия метагалактических структур характеризуется наличием плоских гигантских образований, разделенных большими ($\sim 10^5$ Мпс³) объемами, почти свободными от галактик. Существует мнение [5], что эта структура может быть типа “трехмерной шахматной доски”.

Глобальный поток всего ПКИ с энергиями $E_0 \approx (1-4) \cdot 10^{17}$ эВ по данным Якутской установки ШАЛ [6] не показывает статистически значимой анизотропии. Согласно этой работе, амплитуда первой гармоники по прямому восхождению, найденная традиционным методом гармонического анализа, равна $(0.45 \pm 0.55)\%$. Однако обращает на себя внимание в [6] фаза первой гармоники $\varphi_1 = 192^\circ \pm 70^\circ$. Она, хотя и имеет большую неопределенность, связанную с изотропией ПКИ, но все же указывает на центр Сверхгалактики (C_{SG} на рис.2).

Полученные выше результаты и результаты работы [6] можно объяснить, если предположить, что ПКИ состоит из двух компонент. Одна из них в ≈ 10 раз интенсивнее другой и включает в себя, по-видимому, заряженные частицы, которые сильно перемешаны магнитным полем Галактики. Вторая, образующая кластеры, состоит, скорее всего, из нейтральных частиц внегалактического происхождения. Она хотя и сильно разбавлена изотропным потоком первой компоненты, но ее влияние все же проявляется в результатах [6].

3. Из приведенных выше данных видно, что некоторая часть космических лучей с энергиями

$E_0 \approx (1-4) \cdot 10^{17}$ эВ образует в телесных углах с $d \leq 3^\circ$ множество кластеров (рис.1 и рис.2). Они имеют отрицательную корреляцию с диском Галактики и положительную с диском Сверхгалактики (рис.3). Можно предположить, что кластеры указывают на какие-то внегалактические точечные источники ПКИ, определенным образом связанные с крупномасштабной структурой Вселенной.

Образующие кластеры первичные частицы являются, скорее всего, электрически нейтральными. Иначе из-за движения в магнитных полях Сверхгалактики и, особенно, Галактики они утратили бы связь по направлению с источниками своего образования. Доля этих частиц в общем потоке ПКИ при $E_0 \approx (1-4) \cdot 10^{17}$ эВ приблизительно равна $2969/36825 \approx 0.08$, а при $E_0 \geq 10^{19}$ эВ, согласно [2, 3, 7], она, по-видимому, близка к единице.

Остальные события, не входящие в кластеры, распределены на небесной сфере почти изотропно. Эта часть ПКИ состоит, по-видимому, из заряженных частиц (протонов и ядер различных химических элементов), распространяющихся в Галактике диффузионно. Один из мощных источников находится вблизи центра Галактики [8–10]. Другие источники заряженных частиц обнаружить пока очень трудно из-

за сильного “размазывания” их местоположения магнитным полем Галактики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России Якутской комплексной установки ШАЛ (регистр. # 01-30), включенной в “Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости”.

-
1. А. В. Глушков, Письма в ЖЭТФ **48**, 513 (1988).
 2. А. В. Глушков, М. И. Правдин, Письма в АЖ **27**, 577 (2001).
 3. А. В. Глушков, Письма в ЖЭТФ **73**, 355 (2001).
 4. Я. Б. Зельдович, Письма в АЖ **8**, 195 (1982).
 5. J. Einasto et al., Nature **385**, 139 (1997).
 6. М. И. Правдин, А. А. Иванов, А. Д. Красильников и др., ЖЭТФ **119**, 881 (2001).
 7. А. В. Глушков, М. И. Правдин, ЖЭТФ **119**, 1029 (2001).
 8. N. Hayashida, M. Nagano, D. Nishikawa et al., Astropart. Phys. **10**, 303 (1999).
 9. M. Teshima, M. Shikawa, M. Fukushima et al., Proc. 27-th ICRC, 2001, p. 337.
 10. J. A. Bellido, B. W. Clay, R. B. Dawson, and M. Johnston-Hollitt, astro-ph/0009039 (2000).